

В. А. Кушников, д-р техн. наук, проф., kushnikoff@yandex.ru,
А. С. Богомолов, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., alexbogomolov@yandex.ru,
В. А. Иващенко, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., ivaipmtu@yandex.ru,
А. Д. Селютин, аспирант, aseliutin@ya99.ru,
Федеральный исследовательский центр
"Саратовский научный центр Российской академии наук", г. Саратов,
А. Ф. Резчиков, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., gw4cy@mail.ru,
Институт проблем управления Российской академии наук, г. Москва,
Е. В. Кушникова, канд. техн. наук, проф., доц., lkushnikova@yandex.ru,
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., г. Саратов,
А. И. Марков, аспирант, 8markov8@gmail.com,
Саратовский государственный университет им. Чернышевского Н. Г., г. Саратов

Задача идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия

Описывается новый подход к решению проблемы идентификации аварийных ситуаций в процессах авиаремонтных работ путем формирования метрического пространства аварийных ситуаций и определения расстояния между его точками. Описаны основные этапы ремонта вертолетов Ми-8 и их модификаций на типовом авиаремонтном предприятии. Определены основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций. На основе аппарата системной динамики сформирована математическая модель для классификации характеристик производственных ситуаций, возникающих в процессе ремонта вертолетов Ми-8. Список производственных ситуаций, контролируемых средствами вычислительной техники, составляется ведущими специалистами и включает все ситуации, влияющие на процесс выполнения производственной программы. При анализе производственной ситуации она сравнивается с известными ситуациями, занесенными в базу данных. Если в метрическом пространстве производственных ситуаций обнаруживается ее полное совпадение с известными ситуациями, то ситуация считается известной, ЛПР выдается перечень документов, необходимых для принятия адекватных управленческих решений. В противном случае в метрическом пространстве ситуаций определяется точка, наиболее близкая к возникшей ситуации, и управленческому персоналу выдаются документы, данные и рекомендации, непосредственно связанные с ситуацией, которую эта точка характеризует. Указанный процесс продолжается до тех пор, пока ЛПР не сочтет полученную информацию достаточной и не примет решения, адекватные возникшей ситуации. После окончания производственной ситуации уточненная информация по данным, документам и рекомендациям, использованном управленческим персоналом в процессе принятия решения, заносится экспертами в память ЭВМ, а сама ситуация включается в базу данных, используемую системой управления. Разработан информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов. Разработан программный комплекс в составе систем управления производственными процессами авиационного ремонтного предприятия. Определены показатели эффективности внедрения системы идентификации сложных производственных ситуаций на предприятии.

Ключевые слова: авиаремонтное предприятие, управление, безопасность, идентификация, фюзеляж, метрическое пространство, классификация производственных ситуаций, степень сходства

Введение

В настоящее время в процессе эксплуатации авиапарка страны часто возникает потребность ремонта вертолетов, получивших различные повреждения (рис. 1, см. вторую сторону обложки). Как правило, такие работы выполняются на авиаремонтных предприятиях.

Для повышения оперативности и качества проведения работ на авиаремонтных предпри-

ятиях нередко используются различные виды систем управления производственными процессами. Некоторые из этих систем основаны на анализе прецедентных ситуаций (Case-Based Reasoning Systems) [9].

Теоретическое обоснование принципов функционирования таких систем было осуществлено в работах таких зарубежных и отечественных ученых, как Э. Фейгенбаум, Д. Уотермен, И. В. Прангишвили, Д. А. Пospelov, Г. С. По-

спелов, О. И. Ларичев, Ю. И. Клыков, Э. В. Попов, А. Ф. Резчиков и других [1–8]. В результате практического применения этой теории в настоящее время созданы и хорошо зарекомендовали себя на практике эффективные аппаратные и программные средства управления сложными производственными процессами.

Между тем, как показывает опыт объединения существующих систем автоматизации в единый информационный комплекс, для более успешного создания компьютеризированного интегрированного производства необходимо разработать новые задачи, модели, методы, алгоритмы и программные продукты, позволяющие значительно расширить функциональные возможности системы управления производственными процессами, повысить качество принимаемых решений и получить существенный экономический эффект. При этом основное внимание следует уделить задачам совершенствования математического обеспечения систем управления промышленным предприятием в сложных производственных ситуациях.

Использование прецедентного подхода при управлении сложными производственными

процессами позволяет существенно упростить используемое математическое обеспечение и уменьшить время поиска решений.

Приведенные выше соображения обуславливают актуальность, экономическую целесообразность и практическую значимость темы данной статьи, посвященной совершенствованию математического обеспечения системы управления авиаремонтного предприятия путем разработки новых моделей и методов идентификации производственных ситуаций в существующих системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия.

Структурная схема системы автоматизированного управления производственными процессами авиаремонтного предприятия приведена на рис. 2.

Особенности процесса идентификации производственных ситуаций, возникающих в процессе ремонта вертолетов МИ-8

Вертолет Ми-8 является самым распространенным вертолетом в мире. По данным на

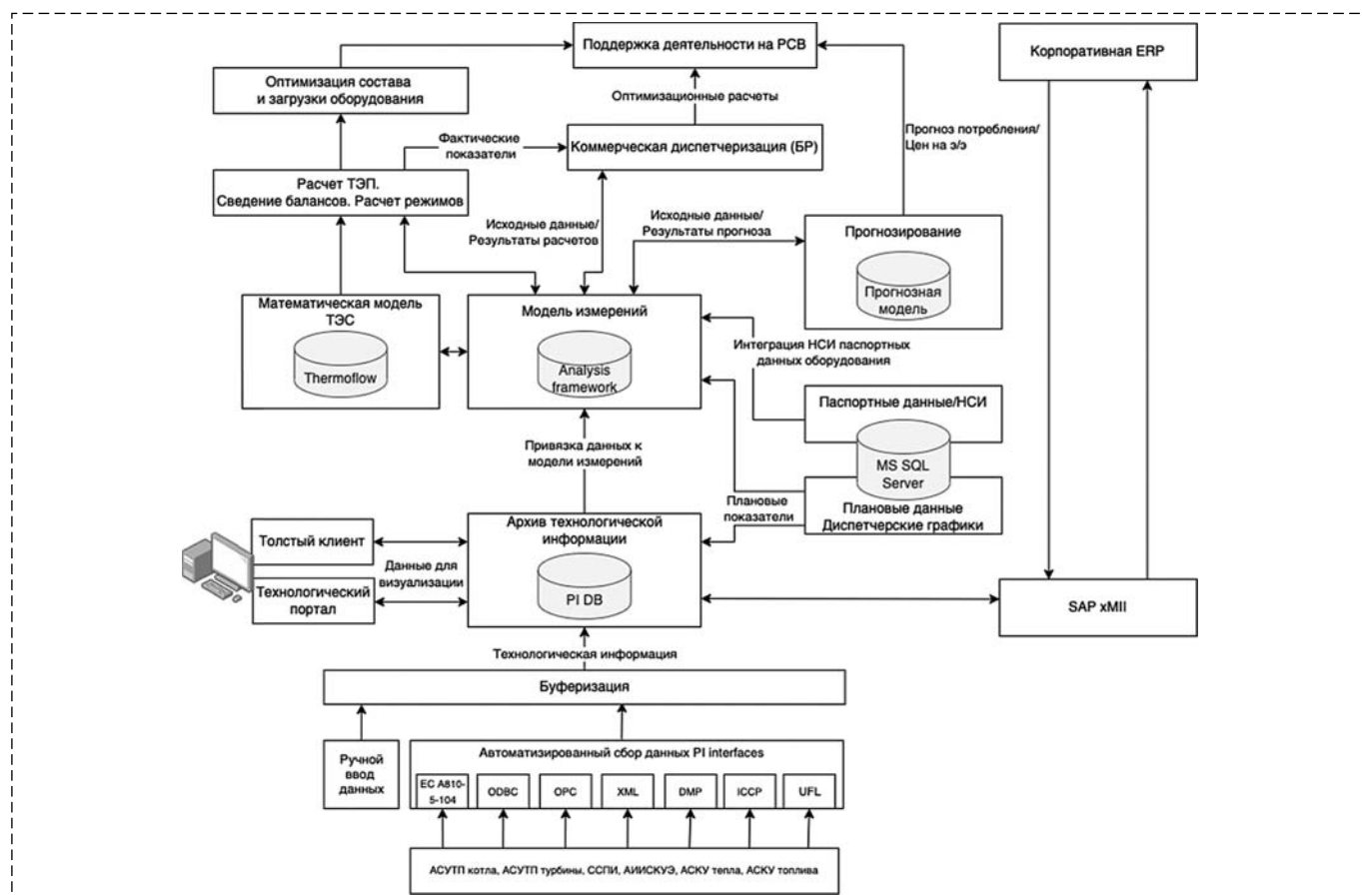


Рис. 2. Структура системы автоматизированного управления производственными процессами авиаремонтного предприятия [4]
Fig. 2. Structure of the automated process control system of an aircraft repair enterprise [4]

2011 г. произведено более чем 12 000 экземпляров данного воздушного судна.

При изготовлении вертолету назначается срок эксплуатации в годах и ресурс в часах налета, после которых вертолет обязан пройти капитальный ремонт на авиационном ремонтном предприятии. Производственный процесс капитального ремонта вертолета — это сложная система, взаимодействующая с внешними целеполагающими системами. Основные элементы конструкции вертолета МИ-8, определяющие структуру производственного процесса авиаремонтного предприятия, изображены на рис. 3 (см. вторую сторону обложки) [10, 11].

Здесь 1 — носовая и средняя части фюзеляжа; 2 — двигатели; 3 — капоты; 4 — вентилятор; 5 — втулка несущего винта; 6 — главный редуктор; 7 — автомат перекося; 8 — редукторная рама; 9 — хвостовая балка; 10 — лопасти несущего винта; 11 — лопасти хвостового винта; 12 — втулка хвостового винта; 13 — хвостовой редуктор; 14 — обтекатель концевой балки; 15 — концевая балка; 16 — стабилизатор; 17 — хвостовая опора; 18 — створки грузового люка; 19 — главные ноги шасси; 20 — подвесные топливные баки; 21 — входные дверь; 22 — сдвижной блистер; 23 — передняя нога шасси; 24 — установка обогревателя КО-50.

Процесс ремонта происходит следующим образом. Заказчик после заключения договора на ремонт предает вертолет авиационному ремонтному заводу (АРЗ). На территории заво-

да приемку осуществляют работники АРЗ на станции летных испытаний (СЛИ) в присутствии представителей заказчика.

Рассмотрим принципиальную схему организации ремонта вертолетов типа Ми-8 и его модификаций на типовом авиаремонтном предприятии, которая представлена на рис. 4.

Здесь РЦ — разборочный цех; П — промывка; Д — определение дефектов; Рм — ремонт, К — комплектация; С — сборка; И — испытания; ОТК — отдел технического контроля; СЛИ — станция летных испытаний.

Во время приемки тщательно проверяется документация, приложенная к вертолету. Основными документами являются формуляры и паспорта на вертолет, силовую установку, авиационное и радиоэлектронное оборудование, а также паспорта на агрегаты вертолета. После проверки соответствия фактических параметров параметрам, указанным в документации, проводится визуальный осмотр. По его результатам все установленные дефекты заносятся в дело ремонта.

Пройдя приемку, вертолет проходит предварительную дефектацию (в том числе проверку геометрии — нивелировку) и поступает в цех № 1. В данном цехе проводится разборка вертолета. Снятые агрегаты распределяются по соответствующим цехам ремонта (№ 1—6). Ремонт агрегатов в цехах, в свою очередь, разбит на семь этапов: разборку, промывку, дефектацию, ремонт, комплектацию, сборку, испытания.

После прохождения этих этапов агрегаты из всех цехов поступают в цех № 1, где проводится дальнейшая сборка, монтаж и покраска. После выполнения всех указанных операций в цехе № 1 выполняются контрольный осмотр вертолета и испытания его агрегатов. Далее вертолет поступает на СЛИ, где проводятся наземные контрольные испытания, заправка вертолета всеми видами ГСМ, его доводка. Затем осуществляются летные испытания. Заказчиками вертолет принимается на СЛИ.

Таким образом, на типовом авиаремонтном предприятии, как правило, проводятся следующие виды работ, определяющие

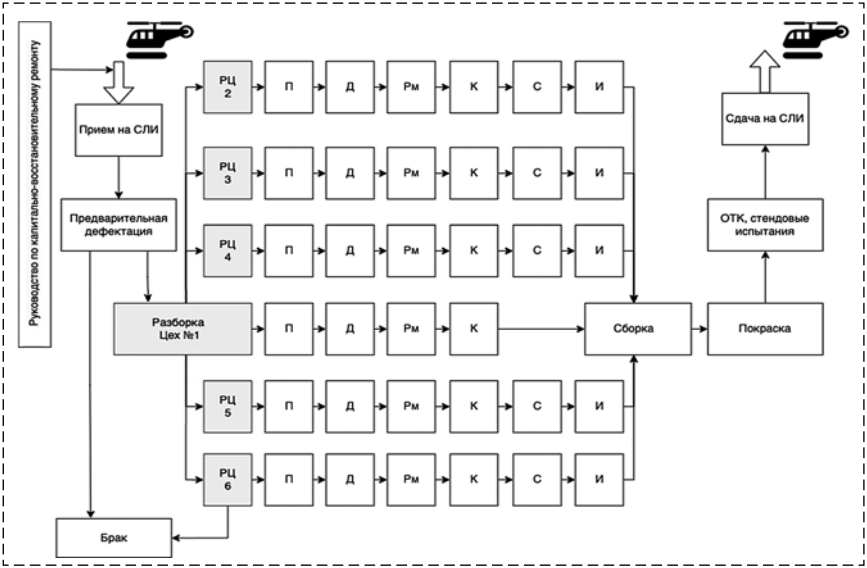


Рис. 4. Основные этапы ремонта вертолетов Ми-8 и их модификаций на типовом авиаремонтном предприятии

Fig. 4. The main stages of Mi-8 helicopters repair at an aircraft repair enterprise

состав и структуру соответствующих производственных процессов:

- ремонтно-восстановительные работы;
- капитальный ремонт вертолетов и их компонентов;
- доработка вертолетов по требованиям заказчика;
- выполнение модификаций вертолета по согласованной документации.

Кроме того, на данном предприятии часто изготавливаются изделия, необходимые для ремонта авиационной техники: элементы остекления вертолета, шланги, трубопроводы, тросы, антенны, жгуты и др.

Постановка задачи

Допустим, что в процессе функционирования авиаремонтного предприятия периодически возникают сложные производственные ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$, требующие принятия решения на основе анализа документов и данных, хранящихся в распределенной базе данных, включающей информацию о множестве различных производственных ситуаций, возникающих на авиаремонтном предприятии. Здесь $a(t), u(t)$ — векторы параметров окружающей среды и управляющих воздействий, характеризующих производственную ситуацию, соответственно. Будем считать, что каждая сложная производственная ситуация $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ однозначно характеризуется множеством характеристик

$$\{Name, Reason, Consequence, Time, Division, Action, A_1, A_2, ..., A_n, Documents, Data\}, \quad (1)$$

где *Name*, *Reason*, *Consequence*, *Time* — наименование, причина, последствия, время начала и окончания производственной ситуации; *Division* — подразделения предприятия, затронутые данной ситуацией; *Action* — мероприятия, необходимые для разрешения ситуации; $A_1, A_2, ..., A_n$ — параметры объекта управления, системы управления и окружающей среды, учитываемые ЛПР при принятии решения в сложившейся ситуации; *Data*, *Documents* — перечень данных и документов, используемых ЛПР при принятии решения.

Примем также, что на предприятии существует информационное хранилище, в котором размещено множество документов $\{D\}$ и

множество данных $\{F\}$, используемых ЛПР при управлении производственным процессом в ситуациях $\{S(a(t), u(t))\}$.

С учетом сделанных допущений формализованная постановка решаемой задачи имеет следующую формулировку.

Для систем управления авиаремонтного предприятия разработать методы и алгоритмы идентификации производственных ситуаций, позволяющие на временном интервале t_h, t_k при известных параметрах среды $a(t) \in \{A(t)\}$ и управляющих воздействиях $u(t) \in \{U(t)\}$, характеризующих сложную производственную ситуацию, в течение времени, отведенного на решение задачи, выполнить следующие действия:

1) установить степень совпадения возникшей сложной производственной ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ с другими из множества $\{S(a(t), u(t))\}$;

2) упорядочить все ситуации множества $\{S(a(t), u(t))\}$ по степени их близости к возникшей ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$ в метрическом пространстве производственных ситуаций;

3) определить данные и документы, которые в возникшей ситуации должен учесть ЛПР в процессе выработки решения: $d_1, d_2, ..., d_w \in \{D\}, f_1, f_2, ..., f_v \in \{F\}, w \ll |\{D\}|, v \ll |\{F\}|$ и упорядочить их по степени важности представляемой информации:

$$\begin{aligned} R(d_z) &> R(d_x) > R(d_c) > ..., > R(d_t), \\ z, x, c, t &\leq w; \\ R(f_{z_1}) &> R(f_{x_1}) > R(f_{c_1}) > ..., > R(f_{t_1}), \\ z_1, x_1, c_1, t_1 &\leq v, \end{aligned}$$

где $\ll$ — значительно меньше, $d_1, d_2, ..., d_w$ — данные, необходимые ЛПР для принятия решения в ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $f_1, f_2, ..., f_v$ — документы, необходимые ЛПР для принятия решения в ситуации $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $R(d_z)$ — ранг документа d_z , характеризующий степень важности документа для процесса выработки решения в возникшей производственной ситуации; $R(f_{z_1})$ — ранг данного f_{z_1} ; w, v — число данных и документов, характеризующих сложную производственную ситуацию $S(a(t), u(t)) \in \{S(a(t), u(t))\}$; $\{U(t)\}, \{A(t)\}$ — множество допустимых значений вектора управляющих воздействий и вектора параметров окружающей среды, соответственно; $|\{D\}|, |\{F\}|$ — мощности множеств $\{D\}$ и $\{F\}$, соответственно.

Разработка метрики для сравнения производственных ситуаций

Основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций в системах управления производственными процессами авиаремонтного предприятия приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Основные этапы решения задачи идентификации производственных ситуаций *The stages of problem solving of identifying production situations*

Этап №	Наименование этапа
1	Классификация характеристик производственных ситуаций
2	Выбор функции сходства для сравнения текстовых характеристик
3	Выбор функции сходства для сравнения временных характеристик
4	Выбор функции сходства для сравнения графовых и числовых характеристик
5	Выбор функции сходства для сравнения наименований ситуаций
6	Выбор метрики пространства производственных ситуаций
7	Определение близости возникшей ситуации к уже происходившим ситуациям

Таблица 2
Table 2

Классификация характеристик типовых производственных ситуаций *Characteristics classification of typical production situations*

Характеристики типовых ситуаций	Символьное обозначение	Представление информации	Классификационная группа
Наименование ситуации	$Name(t)$	В виде текста	D
Причина возникновения	$Reason(t)$	В виде текста	A
Подразделения предприятия, затронутые ситуацией	$Division(t)$	В виде текста	A
Последствия ситуации	$Consequence(t)$	В виде текста	A
Время начала и окончания	$Time(t)$	В числовом виде	B
Документы, необходимые ЛПР для принятия решения	$Documents(t)$	В виде текста	A
Качественные показатели работы предприятия, влияющие на ситуацию	$A_1(t), A_2(t), \dots, A_n(t)$	В виде текста	A
Действия, ликвидирующие ситуацию	$Action(t)$	В виде орграфов	C
Количественные показатели работы предприятия	$Data(t)$	В числовом виде	E

Для ее решения была разработана математическая модель, позволяющая определить расстояния между текущей производственной ситуацией и ситуациями, хранящимися в базе данных предприятия. Для определения расстояния между двумя произвольными производственными ситуациями $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$ необходимо предварительно определить функции, устанавливающие степень сходства между характеристиками этих ситуаций (табл. 2).

Для этого разобьем характеристики множества (1) на пять подмножеств, первое из которых содержит текстовую информацию, второе — время возникновения и окончания производственной ситуации, третье содержит ориентированные графы, используемые ЛПР в процессе подготовки и принятия решения. В четвертом подмножестве хранятся названия производственных ситуаций, в пятом — количественные показатели производственного процесса, учитываемые ЛПР при подготовке и принятии решения. Рассмотрим процедуру формирования функций сходства для каждого из указанных подмножеств, а затем, на основании этих функций, сформируем метрику, определяющую расстояние между сравниваемыми производственными ситуациями $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$.

Для определения сходства между характеристиками второй группы ($Time$) была выбрана функция

$$\Psi_2(S_1, S_2) = 1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}},$$

которая имеет следующие свойства: монотонно возрастает с увеличением степени сходства между сравниваемыми характеристиками; $\Psi_2 = 0$ при полном отсутствии сходства (при $\Delta t = \Delta t_{\max}$); $\Psi_2 = 1$ при наибольшем сходстве (при $\Delta t = 0$).

Характеристики третьей группы ($Action$) представляют собой графы. Для определения функции сходства $\Psi_3(S_1, S_2)$ здесь используются методы количественного анализа, основанные на оценке степени совпадения множеств вершин, дуг и весов дуг у сравниваемых графов. Данные методы подробно рассмотрены в специальной литературе.

Характеристики четвертой группы ($Name$) представляют собой наименования ситуаций $S_1(t), S_2(t) \in \{S(t)\}$, хранящиеся в памяти вычислительного комплекса в виде текстовой информации. Функция сходства между сравниваемыми характеристиками производственных ситуаций имеет следующий вид:

$$\Psi_4(S_1, S_2) = \begin{cases} 1, & \text{при совпадении} \\ & \text{Name}(S_1(t)) \text{ и } \text{Name}(S_2(t)); \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

$\Psi_4(S_1, S_2)$ принимает значение 1, если существует полное совпадение между именами сравниваемых характеристик, или 0, если оно отсутствует.

Расстояние между характеристиками пятой группы определяется по формуле

$$\Psi_5(Data(S_1(t)), Data(S_2(t))) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{S_1} - x_{S_2})_k^2 \eta_k}.$$

Здесь η_k , $k = \overline{1, m}$, — весовые коэффициенты, характеризующие степень влияния количественных характеристик ситуаций $S_1(t)$, $S_2(t)$ на процесс принятия решений.

В качестве функций сходства для характеристик первого подмножества (*Reason, Consequence, Division, Documents*) может быть использован один из приведенных ниже показателей, которые традиционно используются в информационных поисковых системах для сравнения степени совпадения текстовых документов:

$$\left\{ \begin{aligned} \Psi_1^1(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{2 \left(\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} \right)}{\sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk}}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^2(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}, & \\ \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} + \sum_{k=1}^n t_{jk} - \sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^3(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n t_{ik}^2 + \sum_{k=1}^n t_{jk}^2}}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} \neq 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} = 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \\ \Psi_1^4(S_1, S_2) &= \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^n t_{ik} t_{jk}}{\min \left(\sum_{k=1}^n t_{ik}^2, \sum_{k=1}^n t_{jk}^2 \right)}, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} \neq 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} \neq 0; \\ \emptyset, & \text{при } \sum_{k=1}^n t_{ik} = 0, \sum_{k=1}^n t_{jk} = 0; \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где n — число ключевых слов, характеризующих текстовую характеристику; t_{ik} , t_{jk} — переменные, определяющие наличие ($t_{ik} = 1$, $t_{jk} = 1$) или отсутствие ($t_{ik} = 0$, $t_{jk} = 0$) k -го ключевого слова в тексте сравниваемых характеристик, соответственно; $\Psi_i^i(S_1, S_2)$, $i = \overline{1, 4}$, — коэффициенты, характеризующие степень совпадения сравниваемых характеристик.

Функции сходства различных характеристик сравниваемых ситуаций Ψ_i , $i = \overline{1, 9}$, входят в состав метрики ρ_S , определяющей расстояние между $S_1(t)$, $S_2(t) \in \{S(t)\}$ в пространстве производственных ситуаций. При ее формировании принималось во внимание, что $\rho_S(S_1(t), S_2(t))$ должна быть действительной числовой функцией, для которой выполняются известные аксиомы метрики:

$$\begin{aligned} \rho_S(S_1(t), S_2(t)) &= \\ &= \left(G^2 \mu_2 + I^2 \mu_3 + B^2 \mu_4 + \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} \right)^2 \mu_5 + \right. \\ &\quad \left. + R^2 \mu_6 + T^2 \mu_7 + P^2 \mu_8 + M^2 \mu_9 \right)^{1/2} / 8, \end{aligned} \quad (4)$$

где $G = \frac{\sum_{k=1}^n m_{2,S_1,k} m_{2,S_2,k}}{\sum_{k=1}^n m_{2,S_1,k}^2 \sum_{k=1}^n m_{2,S_2,k}^2}$ — функция сравнения причин;

$I = \frac{2 \left(\sum_{k=1}^n m_{3,S_1,k} m_{3,S_2,k} \right)}{\sum_{k=1}^n m_{3,S_1,k}^2 + \sum_{k=1}^n m_{3,S_2,k}^2}$ — функция сравнения последствий;

$B = \frac{\sum_{k=1}^n m_{4,S_1,k} m_{4,S_2,k}}{\min \left(\sum_{k=1}^n m_{4,S_1,k}^2, \sum_{k=1}^n m_{4,S_2,k}^2 \right)}$ — функций сравнения подразделений;

$1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}}$ — функция сравнения длительности;

$R = \frac{\sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k} m_{6,S_2,k}}{\sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k}^2 + \sum_{k=1}^n m_{6,S_2,k}^2 - \sum_{k=1}^n m_{6,S_1,k} m_{6,S_2,k}}$ — функция сравнения документов;

$T = \sqrt{\sum_{k=1}^l ((x_{s_1,k} - x_{s_2,k})^2 \eta_k)^2}$ — функция сравнения количественных показателей;

$P = \zeta_1 \frac{|U_{s_1} \cap U_{s_2}|}{|U_{s_1} \cup U_{s_2}|} + \zeta_1 \frac{|E_{s_1} \cap E_{s_2}|}{|E_{s_1} \cup E_{s_2}|} + \zeta_1 \frac{|Q_{s_1} \cap Q_{s_2}|}{|Q_{s_1} \cup Q_{s_2}|}$ — функция сравнения графов мероприятий;

$$M = \frac{\sum_{k=1}^n m_{9,S_1,k} m_{9,S_2,k}}{\min \left(\sum_{k=1}^n m_{9,S_1,k}^2, \sum_{k=1}^n m_{9,S_2,k}^2 \right)} - \text{функция сравнения качественных показателей.}$$

В качестве функции, заведомо обладающей данными свойствами, было выбрано расстояние риманова пространства, определяемое по формуле

$$\rho_S(S_1(t), S_2(t)) = \left[\sum_{k=1}^9 \Psi_k^2 \mu_k \right]^{1/2}$$

($\mu_k, k = \overline{1,9}$, — весовые коэффициенты, определяемые экспертами).

Разработанная методика определения расстояния между различными производственными ситуациями, возникающими в процессе функционирования объекта управления, позволила сформировать ряд новых алгоритмов, использованных при оперативной идентификации производственных ситуаций и поиске данных в информационных системах интегрированного авиаремонтного предприятия.

Алгоритм решения задачи

Начало алгоритма.

Шаг 1. Просмотр и актуализация списка производственных ситуаций, контролируемых средствами вычислительной техники.

Шаг 2. Новая производственная ситуация возникла? Если "нет", то переход к концу алгоритма. Если "да", то переход к шагу 3.

Шаг 3. Определение характеристик новой производственной ситуации.

Шаг 4. Сравнение характеристик новой производственной ситуации с соответствующими характеристиками ситуаций, занесенных в базу данных.

Шаг 5. Есть ли полное совпадение новой ситуации с ситуацией из базы данных? Если "да", то выдача ЛПР перечня документов, данных и рекомендаций, необходимых для принятия адекватных управленческих решений. Затем переход к концу алгоритма. Если "нет", то переход к шагу 6.

Шаг 6. Упорядочивание списка ситуаций базы данных по убыванию степени близости к новой ситуации с использованием метрики (4).

Шаг 7. Присвоение счетчику ситуаций упорядоченного списка значения 1 ($I = 1$).

Шаг 8. Выдача ЛПР перечня документов, данных и рекомендаций по I -й ситуации.

Шаг 9. ЛПР считает полученную информацию достаточной для принятия управленческих решений? Если да, то принятие решения и переход к шагу 13. Если "нет", то переход к шагу 10.

Шаг 10. Увеличение счетчика ситуаций на единицу, т. е. $I = I + 1$.

Шаг 11. Все ситуации списка просмотрены? Если "да", то выдача сообщения ЛПР "Дополнительной информации нет", принятие решения по уже представленной информации и переход к шагу 13. Если "нет", то переход к шагу 12.

Шаг 12. Переход к шагу 9.

Шаг 13. Уточненная информация по данным, документам и рекомендациям, использованным управленческим персоналом в процессе принятия решения, заносится экспертами в память компьютера, и новая ситуация включается в базу данных системы управления.

Конец алгоритма.

Модельный пример

Описание новой ситуации S_1 . При доставке морским транспортом во время шторма произошло смещение и опрокидывание открытого морского контейнера с вертолетом Ми-8МТВ-1. В результате опрокидывания фюзеляж вертолета получил значительные повреждения отсека фюзеляжа заднего 8МТ.0350.000 с разрушением шпангоутов № 18, 19, 20, 21, 22, 23 с деформаций обшивки и стрингеров. После визуальной оценки степени повреждения вертолета было проведено его нивелирование. По результатам нивелирования выявлено отклонение точки № 25 от продольной оси симметрии вертолета на 35 мм (вправо). По положению точек допускается отклонение ± 30 мм. Точка № 20 отстоит от базы по вертикали на 1164 мм. Занижение составляет 53 мм.

Проведение нивелировочных работ не потребовало транспортировки вертолета на авиационное ремонтное предприятие. Они были выполнены по прибытию в порт специалистом предприятия, использовавшим при проведении работ оригинальный информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов [12—16].

В базе данных информационно-измерительного комплекса хранится информация по прецедентам, с которыми сравнивалась новая ситуация S_1 . В базе данных информационной системы

хранится информация по 10 ситуациям, связанным с деформацией корпуса вертолета: S_2 — деформация узла шасси левого; S_3 — деформация узла шасси правого; S_4 — деформация стабилизатора левого; S_5 — деформация стабилизатора правого; S_6 — деформация хвостовой балки; S_7 — деформация хвостовой балки и вала; S_8 — деформация концевой балки; S_9 — деформация центральной части фюзеляжа; S_{10} — деформация кабины; S_{11} — деформация гаргрота.

С этими ситуациями сравнивалась возникшая новая ситуация S_1 — падение вертолета из контейнера при транспортировке. Результаты сравнения были показаны в виде лепестковых диаграмм на рис. 5 (см. вторую сторону обложки) и занесены в табл. 3. Рассмотрим более подробно процесс формирования этой таблицы для первых двух строк.

Формирование первой строки таблицы. При формировании первой строки таблицы характеристики ситуации S_1 сравниваются сами с собой, поэтому результатом является полное совпадение, и табл. 3 в первой строке записаны единицы.

Формирование второй строки таблицы. Во второй строке таблицы приведены результаты попарного сравнения ситуаций S_1 и S_2 . Для упрощения расчетов при сравнении всех текстовых характеристик используется коэффициент Дайса $\Psi_1^i(S_1, S_2)$.

Сравниваются характеристики "Причина возникновения (*Reason*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 20 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по семи ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(7)}{(25 + 25)} = 0,28.$$

Сравниваются характеристики "Подразделения предприятия, затронутые ситуацией (*Division*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 25 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по 12 ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(12)}{(25 + 25)} = 0,48.$$

Сравниваются характеристики "Последствия ситуации (*Consequence*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 25 ключевыми словами. Совпадение характеристик установлено по 14 ключевым словам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(14)}{(25 + 25)} = 0,56.$$

Сравниваются характеристики "Время начала и окончания (*Consequence*)". По формуле $1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}}$ при $\Delta t_{\max} = 1$ и $\Delta t = 0,93$ имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{1 - 0,93}{1} = 0,07.$$

Сравниваются характеристики "Документы, необходимые ЛПР для принятия решения (*Documentis*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 100 наименованиями документов. Совпадение характеристик установлено по 67 документам. По формуле (3) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(67)}{(100 + 100)} = 0,67.$$

Сравниваются характеристики "Действия, ликвидирующие ситуацию (*Action*)". Характеристики каждой ситуации характеризуются 50 различными мероприятиями. Совпадение характеристик установлено по 27 мероприятиям. По формуле (2) имеем

$$\Psi_1^i(S_1, S_2) = \frac{2(27)}{(50 + 50)} = 0,54.$$

Сравниваются характеристики "Количественные показатели работы предприятия (*Data*)". Для 34 количественных показателей при весовых коэффициентах, равных $1/34$ каждый, имеем

$$\Psi_4(Data(S_1), Data(S_2)) = 0,24.$$

В итоге, воспользовавшись формулой (4), при равных весовых коэффициентах $\mu_i = \frac{1}{7}$, $i = \overline{1, 7}$, а также при $M^2\mu_9 = 0$ имеем

$$\begin{aligned} \rho_S(S_1, S_2) &= \left(G^2\mu_2 + I^2\mu_3 + B^2\mu_4 + \left(1 - \frac{\Delta t}{\Delta t_{\max}} \right)^2 \mu_5 + R^2\mu_6 + T^2\mu_7 + P^2\mu_8 \right)^{1/2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{0,1225}{7} + \frac{0,0576}{7} + \frac{0,0784}{7} + \frac{0,0049}{7} + \frac{0,4489}{7} + \frac{0,2916}{7} + \frac{0,0576}{7} \right)} = 0,3894. \end{aligned}$$

Степень сходства сравниваемых ситуаций
The degree of compared situations similarity

Наименование ситуации (Name)	Результаты сравнения характеристик новой ситуации с характеристиками типовых ситуаций из БД								Совпадение ситуаций из БД с новой ситуацией
	Reason	Division	Consequence	Time	Documents	Quality indicators	Action	Data	
Новая ситуация: падение вертолета из контейнера при транспортировке (S_1)	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Деформация узла шасси левого (S_2)	0,28	0,48	0,56	0,07	0,67	—	0,54	0,24	0,3643
Деформация узла шасси правого (S_3)	0,12	0,24	0,16	0,56	0,78	—	0,69	0,93	0,5432
Деформация стабилизатора левого (S_4)	0,49	0,73	0,59	0,45	0,65	—	0,56	0,15	0,5101
Деформация стабилизатора правого (S_5)	0,54	0,73	0,47	0,23	0,34	—	0,89	0,23	0,5227
Деформация хвостовой балки (S_6)	0,35	0,54	0,13	0,25	0,23	—	0,23	0,29	0,2927
Деформация хвостовой балки и вала (S_7)	0,17	0,59	0,47	0,63	0,38	—	0,53	0,26	0,4345
Деформация концевой балки (S_8)	0,48	0,65	0,11	0,13	0,57	—	0,15	0,13	0,3616
Деформация центральной части фюзеляжа (S_9)	0,79	0,85	0,69	0,49	0,82	—	0,79	0,68	0,6916
Деформация кабины (S_{10})	0,37	0,85	0,59	0,53	0,67	—	0,89	0,59	0,6344
Деформация гаргрота (S_{11})	0,29	0,27	0,17	0,18	0,23	—	0,34	0,34	0,1841

Таблица 4
Table 4

Основные показатели эффективности внедрения
Key performance indicators of implementation

Максимальное время обнаружения (мин)		Среднее время реакции на обнаруженную ситуацию (мин)		Число своевременно обнаруженных ситуаций (шт.)		Число ошибочных управлений диспетчера (шт.)	
До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения	До внедрения	После внедрения
360	60	55...40	25...15	25	4...7	>50	<5

Результаты расчетов занесены во вторую строку табл. 3. Аналогично формируются и остальные строки этой таблицы. Степень сходства новой ситуации S_1 и типовых ситуаций количественно охарактеризована в табл. 3.

Специалист авиационного ремонтного предприятия, командированный в порт для предварительной оценки возникшей ситуации, пересылает на предприятие результаты проведенных замеров и расчетов с указанием ситуаций, наиболее близких к возникшей ситуации. В данном случае наиболее близкими к S_1 будут ситуации S_9 — деформация центральной части фюзеляжа — и S_{10} — деформация кабины. После выполненных сравнений информационно-измерительный комплекс выдает на экран информацию, характеризующую степень близости возникшей ситуации S_1 к ситуациям (рис. 5, см. вторую сторону обложки).

Здесь S_1 — новая ситуация; S_2 — деформация узла левого шасси; S_3 — деформация узла правого шасси; S_4 — деформация левого стабилизатора; S_5 — деформация правого стабилизатора; S_6 — деформация хвостовой балки; S_7 — деформация хвостовой балки и вала; S_8 —

деформация концевой балки; S_9 — деформация центральной части фюзеляжа; S_{10} — деформация кабины; S_{11} — деформация гаргрота.

Использование разработанного математического и программного обеспечения позволило повысить качество управленческих решений. Используемый информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов позволил получить конкурентные преимущества в отношении других авиаремонтных предприятий и организаций (табл. 4).

Заключение

В статье предложена и обоснована новая методика оперативной идентификации аварийных ситуаций в системах управления авиационных ремонтных предприятий, осуществляющих ремонт вертолетов Ми-8 и модификаций. Методика основана на идее формирования метрического пространства аварийных ситуаций и определении расстояния между его точками по формулам, традиционно используемым в системах распознавания образов при оценке сходства между сравни-

ваемыми информационными объектами. Разработан информационно-измерительный комплекс для диагностирования дефектов геометрических параметров фюзеляжей вертолетов. Предложено и обосновано тиражируемое информационно-программное обеспечение, позволяющее осуществить внедрение основных результатов статьи в состав систем управления производственными процессами авиационного ремонтного предприятия.

Список литературы

1. Аветисян Ю. А., Кушников В. А., Резчиков А. Ф., Родичев В. А. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43–47.
2. Воробьев В. Г., Глухов В. В., Козлов Ю. В. Диагностика и прогнозирование технического состояния авиационного оборудования. М.: Транспорт, 1984. 182 с.
3. Добрынин А. С., Гудков М. Ю., Койнов Р. С. Прецедентный подход к управлению инцидентами в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Программные системы и вычислительные методы. 2020. № 2. С. 45–52. DOI: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040
4. Зуев В. Е., Фадеев В. Я. Лазерные навигационные устройства. М.: Радио и связь, 1987. 160 с.
5. Инструкция по технической эксплуатации вертолета МИ-8. Книга 4. С. 45–57.
6. Марков А. И., Кушников В. А. Задача оперативного диагностирования дефектов фюзеляжа вертолета МИ-8 при

проведении предварительной оценки его ремонтпригодности // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2012. С. 95–101.

7. Марков А. И., Кушников В. А. Задачи, модели и алгоритмы управления ремонтом вертолетов на авиационном ремонтном предприятии // Естественные и технические науки. № 3 (59). 2012. С. 272–274.
8. Нормы летной годности гражданских вертолетов. М.: Изд. ЦАГИ, 1987. 350 с.
9. Поспелов Г. С., Ириков В. А. Программно-целевое планирование и управление. М.: Советское радио, 1976. 440 с.
10. Поспелов Д. А. Логико-лингвистические модели в системах управления. М.: Энергоиздат, 1981 г. 220 с.
11. Фейгенбаум Э., Фельдмана Дж. Вычислительные машины и мышление, М.: Мир, 1967 г. 552 с.
12. Akhmetov, A., Shkolnikova E. The development of methods for assessing the reliability of new aircraft and engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 421, Iss. 1. P. 120–130.
13. Amin M., Raza K., Khan S. Maintenance practices and challenges facing aviation industry in Pakistan // Journal of Quality in Maintenance Engineering. 2019. Vol. 25, Iss. 1. P. 75–87.
14. Borisov V., Boldyrev S., Sotnikova N. Efficiency of the Aviation Enterprises Activity: The Russian Experience // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1236, Iss. 1. P. 128–137.
15. Hamdaoui M., Korichi S., Ben L. Improvement of Decision Making by Implementing a Risk Management System in Aircraft Maintenance // International Journal of Engineering & Technology. 2019. Vol. 8, Iss. 1.1. P. 276–279.
16. Porter B., Bareiss R., Holte R. C. Concept learning and heuristic classification in weak-theory domains // Artificial Intelligence. 1990. Vol. 45, Iss. 1–2. P. 229–263.

The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise

V. A. Kushnikov, kushnikoff@yandex.ru, A. S. Bogomolov, alexbogomolov@yandex.ru,

V. A. Ivashenko, ivaipmtu@yandex.ru, A. D. Selyutin, aseliutin@ya99.ru,

Federal State Budgetary Institution Federal Research Centre "Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", Saratov, 410028, Russian Federation,

A. F. Rezchikov, rw4cy@mail.ru,

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russian Federation,

E. V. Kushnikova, lkushnikova@yandex.ru,

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, 410054, Russian Federation,

A. I. Markov, 8markov8@gmail.com,

Saratov State University, Saratov, 410012, Russian Federation

Corresponding author: Selyutin A. D., Postgraduate Student, Federal State Budgetary Institution Federal Research Centre "Saratov Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences", Saratov, 410028, Russian Federation, e-mail: aseliutin@ya99.ru

Accepted on April 17, 2023

Abstract

This research provides a new approach to solving the problem of identifying emergency situations in the processes of aircraft repair work by forming a metric space of emergency situations and determining the distance between its points. The main stages of repair of Mi-8 helicopters and their modifications at a typical aircraft repair facility are described. The main stages of solving the problem of identifying production situations are determined. Model has been formed to classify the characteristics of production situations that arise during the repair of Mi-8 helicopters. When analyzing the production situation, it is compared with known situations recorded in the database. If its complete coincidence with known situations is found in the metric space of production situations, then the situation is considered known, the decision maker is issued a list of documents. Otherwise, in the metric space of situations, the point closest to the situation that has arisen is deter-

mined, and management personnel are given documents. After the end of the production situation, the updated information on the data, documents and recommendations used by the management personnel in the decision-making process is entered by experts into the computer memory, and the situation itself is included in the database used by the management system. A software package has been developed as part of the production process management systems of an aircraft repair company. The efficiency indicators of the implementation of the identification system of complex production situations at the enterprise are determined.

Keywords: aircraft repair enterprise, case management, safety, identification, fuselage, metric space, classification of production situations, degree of similarity, helicopter, transportation

For citation:

Kushnikov V. A., Bogomolov A. S., Ivashenko V. A., Selyutin A. D., Rezhnikov A. F., Kushnikova E. V., Markov A. I. The Problem of Production Situations Identification in the Systems of Production Processes Management of an Aircraft Repair Enterprise, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2023, vol. 24, no. 9, pp. 451–461 (in Russian).

DOI: 10.17587/mau.24.451-461

References

1. Avetisyan Y. A., Kushnikov V. A., Rezhnikov A. F., Rodichev V. A. Mathematical models and algorithms for operational management of emergency response processes, *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2009, no. 11, pp. 43–47 (in Russian).
2. Vorobyev V. G., Gluhov V. V., Kozlov U. V. Diagnostics and forecasting of the technical condition of aviation equipment, Moscow, Transport, 1984, 182 p. (in Russian).
3. Dobrynin A. S., Gudkov M. U., Koinov R. S. A case-based approach to incident management in automated process control systems. *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2020, no. 2, pp. 45–52, DOI: 10.7256/2454-0714.2020.2.31040 (in Russian)
4. Zuev V. E., Fadeev V. Ya. Laser navigation devices, Moscow, Radio i svyaz, 1987, 160 p. (in Russian).
5. **Instructions** for the technical operation of the MI-8 helicopter, vol. 4, pp. 45–57 (in Russian).
6. Markov A. I., Kushnikov V. A. The task of rapid diagnosis of defects in the fuselage of the MI-8 helicopter during a preliminary assessment of its maintainability, *Izvestiya vuzov. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 95–101 (in Russian).
7. Markov A. I., Kushnikov V. A. Tasks, models and algorithms of helicopter repair management at an aviation repair company, *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2012, no. 3, pp. 272–274 (in Russian).
8. **Airworthiness** standards of civil helicopters, Moscow, *Izd. TSAGI*, 1987, 350 p. (in Russian).
9. Pospelov G. S., Irikov V. A. Program-target planning and management, Moscow, Sovetskoe radio, 1976 (in Russian).
10. Pospelov D. A. Logical-linguistic models in control systems, Moscow, Energoizdat, 1981, 220 p. (in Russian).
11. Feigenbaum A., Feldman J. Computing machines and thinking, Moscow, Mir, 1967, 552 p. (in Russian).
12. Akhmetov, A., Shkolnikova E. The development of methods for assessing the reliability of new aircraft and engines, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 421, iss. 1, pp. 120–130.
13. Amin M., Raza K., Khan S. Maintenance practices and challenges facing aviation industry in Pakistan, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2019, vol. 25, iss. 1, pp. 75–87.
14. Borisov V., Boldyrev S., Sotnikova N. Efficiency of the Aviation Enterprises Activity, *The Russian Experience, Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1236, iss. 1, 2019, pp. 128–137.
15. Hamdaoui M., Korichi S., Ben L. Improvement of Decision Making by Implementing a Risk Management System in Aircraft Maintenance, *International Journal of Engineering & Technology*, 2019, vol. 8, iss. 1.1, pp. 276–279.
16. Porter B., Bareiss R. Holte R. C. Concept learning and heuristic classification in weak-theory domains, *Artificial Intelligence*, 1990, vol. 45, iss. 1–2, pp. 229–263.